

OPTYKA

Uwagi wstępne

Światło jest częścią bardzo rozległego zakresu (widma) fal elektromagnetycznych. Fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z największą znaną w przyrodzie prędkością c :

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Równania opisujące fale elektromagnetyczne są analogiczne do tych, które omawialiśmy w Mechanice. Wielkościami, które są „wychyleniem” w fali elektromagnetycznej, a zatem tym co się zmienia w funkcji położenia i czasu, są natężenie pola elektrycznego \mathbf{E} oraz indukcja magnetyczna \mathbf{B} . I tak na przykład, jeśli wytworzymy płaską falę elektromagnetyczną (przybliżenie takie może być poprawne w szczególności, gdy jesteśmy daleko od źródła światła), to opisują ją następujące równania:

$$E_y = E_{0y} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

oraz

$$B_z = B_{0z} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

gdzie E_{0y} oraz B_{0z} są amplitudami natężenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetycznej.

Jak więc widzimy, światło możemy opisać jako falę, z drugiej strony jednak wiele doświadczeń pokazuje inny charakter światła, a mianowicie jego cząsteczkową (korpuskularną) naturę. Dlatego też w wielu sytuacjach, szczególnie, gdy opisujemy światło o małych długościach fali, możemy je przedstawić jako strumień cząstek zwanych *fotonami*. Każdy foton jest „paczką energii” (lub kwantem energii) przenoszącą energię o wartości:

$$E = h\nu \quad (3)$$

gdzie h jest stałą Plancka, zaś ν jest częstotliwością fali świetlnej.

Zastanówmy się, dlaczego niektóre ciała są przezroczyste a inne nie. Jeśli energia fotonów, odpowiadających danej fali świetlnej, jest taka sama jak różnice poziomów energetycznych elektronów lub atomów ciała, to kwanty te są pochłaniane i ciało jest nieprzezroczyste. W przeciwnym wypadku ciało nie pochłania fotonów i światło przechodzi na „wylot”, a zatem ciało jest przezroczyste dla światła.

Foton przenosi też pęd; omawiając szczególną teorię względności doszliśmy do wniosku, że pęd ciała nie posiadającego masy spoczynkowej ($m_0 = 0$, a taki właśnie jest foton) wynosi $p = E/c$, a zatem dla fotonu:

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (4)$$

Przykładowo, jeśli fotony odbijają się sprężysto (np. od lusterka), to każdy z nich przekazuje lusterku pęd $2h\nu/c$.

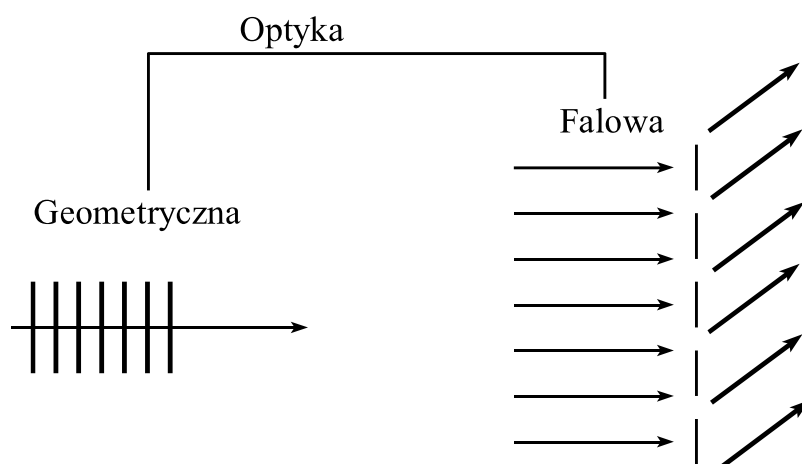
Tak, więc światło z jednej strony może być opisane jako zjawisko falowe, zaś z drugiej jako zbiór fotonów przenoszących energię i pęd (jest to słynny dualizm korpuskularno-falowy).

Własności falowe ujawniają się szczególnie dla dużych długości fali światła, zaś korpuskularne – dla fal krótkich.

Podobnie też, przy opisie zjawisk optycznych używamy dwóch przybliżeń:

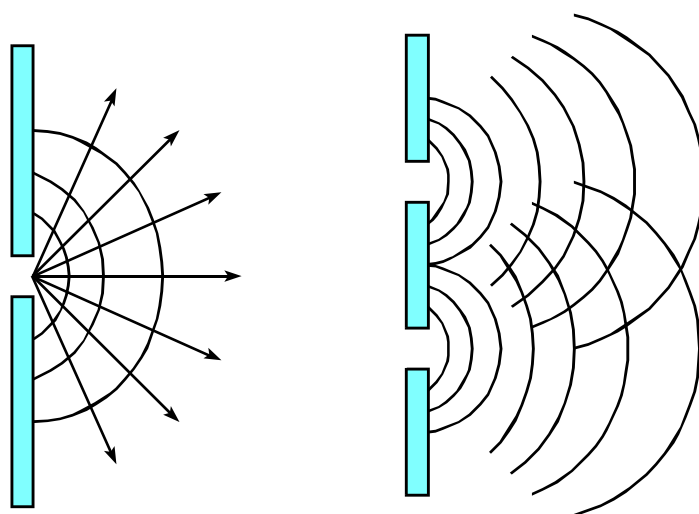
- optyki geometrycznej (dającej poprawny opis dla fal o długościach znacznie mniejszych od rozmiarów „przeszkód”, które napotyka światło), oraz
- optyki falowej (gdy długość fali jest porównywalna z rozmiarami przedmiotów, z którymi oddziałuje, np. z szerokością szczelin na których następuje ugięcie światła).

Poniżej pokazano dwie sytuacje, które ilustrują użycie optyki geometrycznej oraz falowej: prostoliniowe rozchodzenie się światła oraz zmianę kierunku biegu światła wskutek ugięcia na szczelinie dyfrakcyjnej.



* *Promień świetlny (kierunek rozchodzenia się światła) to wektor prostopadły do powierzchni fazowej fali – jest to podstawowe pojęcie w optyce geometrycznej,*

* *W szczelinach siatki dyfrakcyjnej następuje dyfrakcja i interferencja fali świetlnej, co prowadzi do zmiany kierunku rozchodzenia się fali – jest to zjawisko opisywane przez optykę falową. Niemniej, bieg wiązki padającej jak i ugiętej przedstawiany jest schematycznie przez promienie świetlne.*



A oto, co dzieje się w każdej ze szczelin:

- *szczelina staje się źródłem fali kulistej (przedstawionej poprzez promienie świetlne prostopadłe do powierzchni fazowej) - rysunek po lewej,*
- *fale wychodzące z dwóch szczelin (rysunek po prawej) interferują ze sobą i w pewnych*

kierunkach powstaną wiązki wzmocnione, jak to przedstawiono schematycznie na poprzednim rysunku.

Fala elektromagnetyczna (a więc i świetlna) przenosi oczywiście energię; przepływ energii opisuje się tzw. wektorem Poyntinga \mathbf{S} zdefiniowanym jako:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

Wektor \mathbf{S} podaje kierunek przepływu energii przenoszanej przez falę oraz jej moc przypadającą na jednostkę prostopadłej do tego kierunku powierzchni (wyrażoną w W/m^2).

W zakresie fal świetlnych występuje także efekt Dopplera, analogicznie jak dla fal akustycznych. Jednak zależność ilościowa jest inna niż dla fal akustycznych, gdyż wyrażenie na zmianę częstotliwości rejestrowanej fali w funkcji prędkości względnej odbiorcy i nadawcy sygnału uzyskuje się na bazie szczególnej teorii względności. Wykazuje się, że obserwowana przez odbiorcę częstotliwość fali świetlnej, f' , wynosi:

$$f' = f \frac{\sqrt{1+\beta}}{\sqrt{1-\beta}} \quad (6)$$

gdzie $\beta = u/c$, u jest względną prędkością nadawcy i odbiorcy sygnału (dodatni znak u odpowiada sytuacji, gdy nadawca i odbiorca zbliżają się do siebie, zaś ujemny – gdy się oddalają) oraz f jest częstotliwością, którą zmierzy nadawca w swoim układzie.

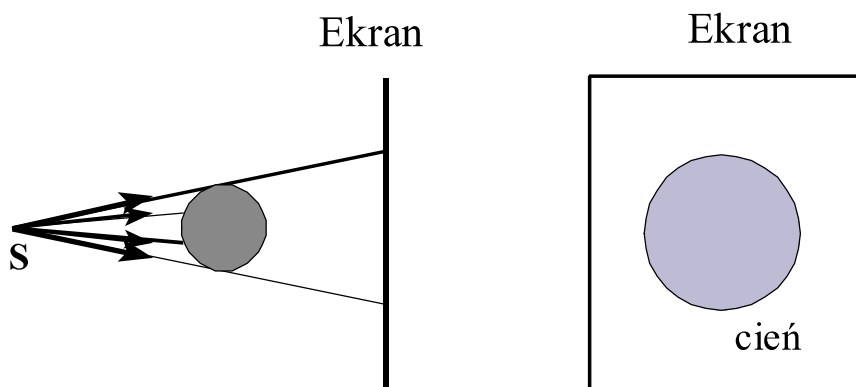
OPTYKA GEOMETRYCZNA

Optyka geometryczna zajmuje się zagadnieniami związanymi z rozchodzeniem się światła w różnych ośrodkach, przy czym zakłada się, że światło rozchodzi się po liniach prostych.

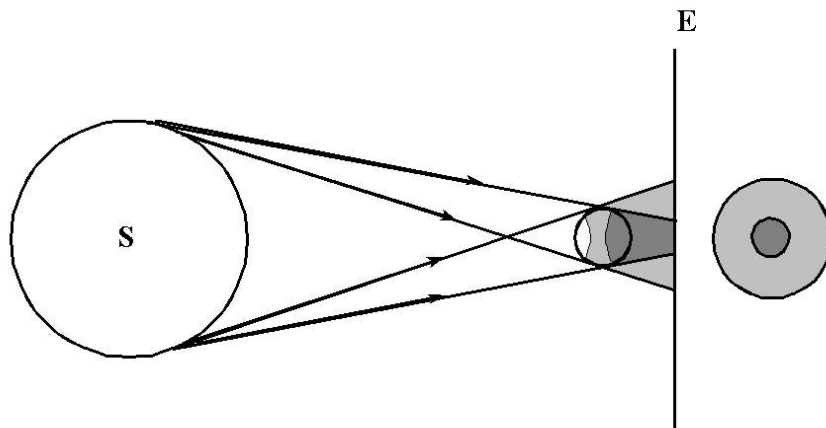
Wprowadza się pojęcie promienia świetlnego, który jest kierunkiem normalnym do powierzchni fazowej rozchodzącej się fali.

Opis w ujęciu optyki geometrycznej pozostaje słuszny, jeśli rozmiary przegród, szczelin i otworów, na które napotyka światło, są znacznie większe od długości fali świetlnej.

Typowym przykładem, który jest dobrze opisywany przez optykę geometryczną jest powstawanie cienia i półcienia:



Cień powstaje wtedy, gdy rozmiar świecącego źródła jest znacznie mniejszy niż rozmiar oświetlanego obiektu.



Półcień powstaje wtedy, gdy rozmiar świecącego źródła jest większy niż rozmiar oświetlanego obiektu.

Cień lub półcień powstaje na powierzchni Ziemi przy całkowitym lub częściowym zaćmieniu Słońca; ciałem przesłaniającym jest oczywiście Księżyc.

Prawa optyki geometrycznej

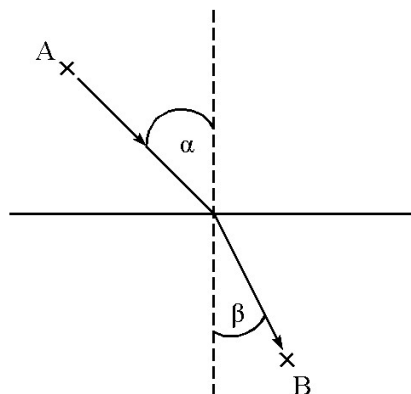
Omówimy teraz podstawowe prawa optyki geometrycznej.

1. Prawo prostoliniowego rozchodzenia się światła:

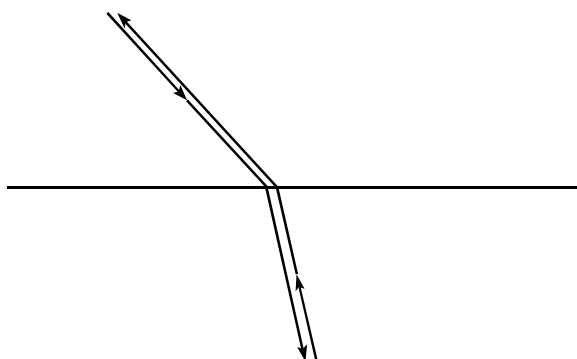
Fala świetlna (opisywana przez promień świetlny) rozchodzi się po liniach prostych. Trzeba jednak pamiętać, że gdy długość fali zbliża się do rozmiarów szczelin, otworów, itp., to prawo to przestaje obowiązywać (występuje wtedy zjawisko dyfrakcji).

2. Zasada Fermata:

Światło biegnąc od A do B wybiera taką drogę, aby czas jej przebycia był albo najkrótszy albo najdłuższy. Na przykład promień świetlny, padając na granicę dwóch różnych ośrodków (pod kątem α) załamuje się pod takim kątem β , aby spełnić tę zasadę (czas jest najkrótszy).

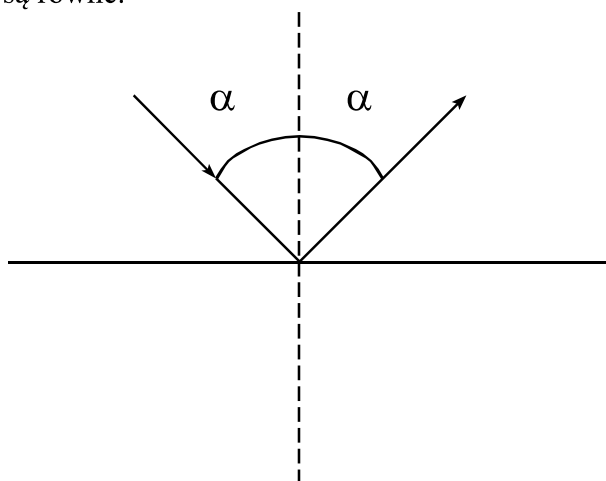


3. Bieg promienia jest odwracalny

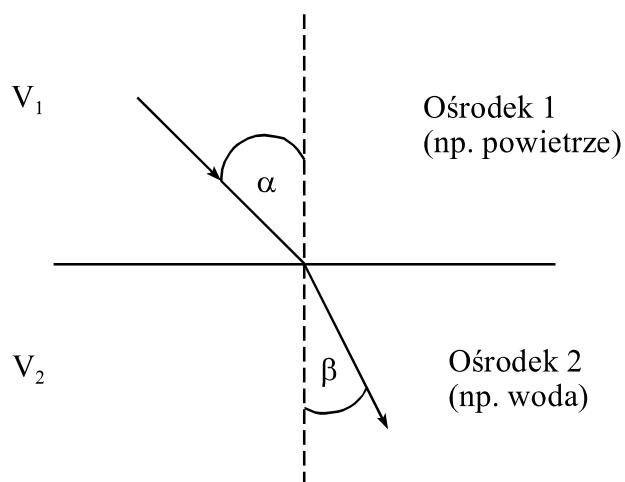


4. Prawo odbicia:

Kąty padania i odbicia są równe.



5. Prawo załamania:



Kąty padania (α) i załamania (β) spełniają następującą zależność:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7)$$

Przy czym v_1 i v_2 są prędkościami światła w ośrodkach 1 i 2. Zależność powyższa zwana jest prawem Snelliusa.

Dla danego ośrodka definiujemy bezwzględny współczynnik załamania (względem próżni):

$$n = \frac{c}{v} \quad (8)$$

gdzie v jest prędkością światła w tym ośrodku.

Tak więc dla powyżej rozważanych ośrodków 1 i 2, ich współczynniki bezwzględne wynoszą:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}$$

oraz

$$n_2 = \frac{c}{v_2}$$

Definiujemy także względny współczynnik załamania (ośrodka 2 względem 1):

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

a zatem:

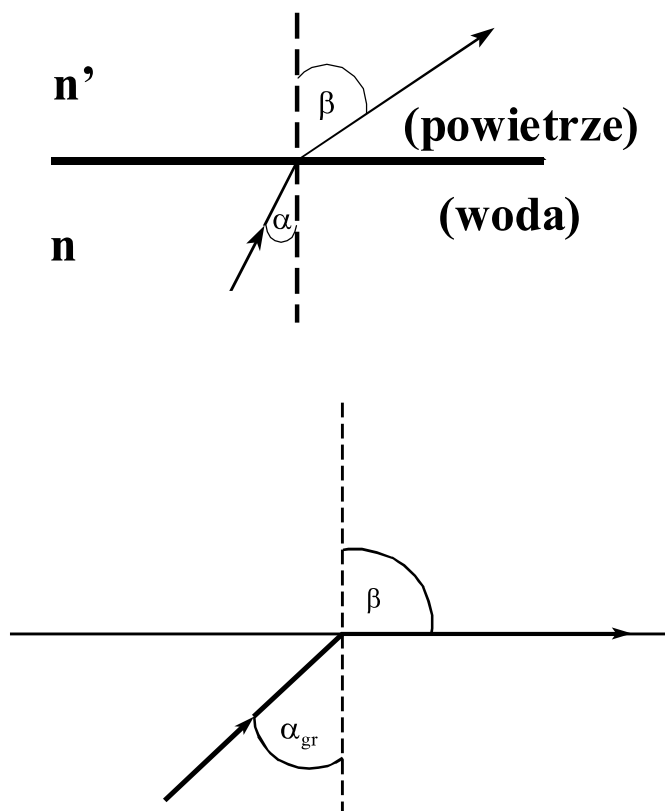
$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (10)$

Współczynnik ten charakteryzuje załamanie światła przy przejściu od ośrodka 1 do 2.

6. Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia

Efekt ten może zajść przy wychodzeniu światła z ośrodka optycznie gęstszego (np. woda, szkło) do ośrodka optycznie rzadszego (np. powietrze). Zgodnie z prawem Snelliusa (patrz rysunek poniżej):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n'}{n} \quad (11)$$



Kąt padania α_{gr} odpowiada kątowi ugięcia $\beta=90^0$.

Warunek graniczny dla zajścia całkowitego wewnętrznego odbicia odpowiada kątowi $\beta=90^0$; kątowi padania α odpowiada wtedy wartość graniczna: α_{gr} . Przy większym kącie padania promień padający już nie załamie się, lecz ulegnie wewnętrznemu odbiciu.

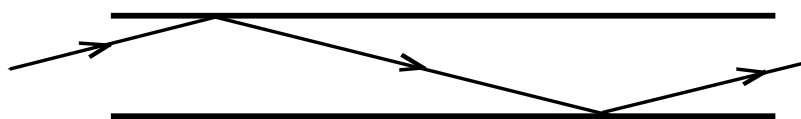
W rozważanym przez nas przypadku $n' \cong 1$ (dla powietrza), więc, z Równ. 11 mamy:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{n} \quad (12)$$

W równaniu tym n jest bezwzględnym współczynnikiem załamania ośrodka optycznie gęstszego (zakładamy, że ośrodkiem rzadszym jest próżnia lub powietrze).

Jeśli światło wychodzi z wody do powietrza to wtedy $n = 1,33$ oraz $\alpha_{gr} = 48^0 30'$.

Dzięki zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia światło prowadzone jest wewnątrz światłowodu (używanego do przesyłania dużych ilości informacji, np. w łączach internetowych). Pokazano to schematycznie poniżej. Ważne jest, aby włókien światłowodu nie zginać pod zbyt ostrym kątem, gdyż wtedy kąt padania α miałby mniejszą wartość niż α_{gr} i fala świetlna opuściłaby światłowód.



Dzięki zjawisku wielokrotnego wewnętrznego odbicia światło „prowadzone jest” w światłowodzie.